



아스팔트 혼합물의 소성변형 특성 평가치로 변형강도(S_D)의 도입

Introduction of Deformation Strength for Estimation of Asphalt Mixture's Rut-Resistance Characteristics

김현환* 백성현* 김진철* 라일호* 박남원* 도영수** 김광우***

1. 서론

아스팔트혼합물의 소성변형 저항성 평가를 위해서 비교적 여러 가지 시험법이 이용된다. 하지만 대부분 시험 방법은 동하중하에서 이루어져 번거로우며 배합설계 단계에서부터 직접 적용이 되지 못하고 일단 배합 설계된 혼합물의 특성화인 차원에서 사용된다. 하지만 국내에서는 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성시험결과들과 상관관계가 높은 시험특성치인 변형강도(Deformation Strength; S_D)를 개발하고 이를 국내 아스팔트 혼합물의 배합설계 변수로 채택하였다. 이제까지 연구결과 S_D 는 wheel tracking 시험결과와 결정계수(R^2)가 0.9이상, APA, 동적크리프, 현장모의주행시험(Field Circular Wheel Tracking) 결과와 R^2 이 0.75 이상 등 높은 상관성을 보였다(1-4). 또한 현장코어에 대한 S_D 와 실제포장의 소성변형 상태와의 상관성분석에서도 R^2 이 0.7 이상을 보였다. 따라서 본 논문에서는 이 새로운 특성치의 개발단계부터의 배경소개와 변형강도의 특성에 대한 고찰을 통해 장단점을 분석하고 그 결과를 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 변형강도

2.1 개발 배경

아스팔트 포장에서의 소성변형은 넓은 포장 면 위에 하중이 가해진 곳만이 들어가는 일종의 국부 변형이다. 따라서 이와 같은 변형 형상을 모사하여 공시체의 넓은 면 위에 국부적으로 하중을 가하고 이에 대한 저항력을 측정하면 지금의 안정도나 압축강도 등과 같이 전면에 하중을 가하여 측정하는 특성치보다 소성변형 특성과의 상관성이 더 높은 강도치를 개발 할 수 있을 것이다. 특히 변형이 단순 압축이나 인장이 아닌 압축-전단의 조합응력으로 유발되게 하면서, 재하지역이 작아 국부 외의 모체는 자연적으로 변형을 억제하는 역할을 하게 되면 상관성이 높을 것이다. 이에 착안하여 시험법을 잘 고안한다면 비교적 간단한 방법으로도 소성변형과의 상관성이 높은 특성치를 개발 할 수 도 있을 것이라는 전제하에 다음과 같은 기본 조건을 설정하고 연구를 시작하였다.

- ① 쉽게 제조 가능한 공시체에 정하중을 적용하며 시험방법이 간편해야 한다.
- ② 현장상태와 같이 혼합물의 다짐 면 위에 차륜의 재하방향과 같이 하중을 가한다.
- ③ 공시체는 실제포장과 같이 측면이 구속된 상태에서 하중은 가운데만 국부적으로 가한다.

* 강원대학교 지역건설공학과 대학원

** 강원대학교 석재복합 건설신소재 연구소 연구교수 · 공학박사(E-mail:youngsdoh@hanmail.net)

*** 강원대학교 지역건설공학과 교수 · 공학박사(E-mail:asphalttech@hanmail.net)



- ④ 하중 붕을 통해 원형 접지면의 타이어가 누르듯이 움푹한 변형을 유발토록 한다.
- ⑤ 변형은 압축-전단에 의해 유발되며 저항성은 가해진 하중과 변형의 함수로 구하여 이것이 소성변형 특성을 잘 반영하는지 검증한다.

여기서 ①의 전제조건은 간편하여 이해가 쉬운 시험법이라야 보급이 잘되고 활용성이 큰 점을 염두에 둔 것이다. 혼합물은 일정온도로 가열된 상태를 전제로 하며 이는 wheel tracking 등에 널리 사용되는 60℃를 시험조건으로 시작 하였다.

②는 아스팔트 포장체는 다짐시 골재배열 때문에 등방성(Isotropic)이 아니므로 하중을 가하는 방향에 따라 강도에 차이가 날 수 있음에도 마찰 안정도와 같이 혼합물의 다짐방향과 재하 방향이 다르게 측정하는 문제점을 염두에 둔 것이다. 즉, 윗하중은 포설시 다짐방향과 같이 수직으로 작용하는데 안정도는 포설된 포장의 측면에서 하중을 가하는 형식이다.

③, ④는 현장에서의 포장 상태와 재하상태를 최대한 모사하기 위한 조건이다. 단, 윗하중이 동하중이나 이를 정하중으로 설정한 점은 시험의 간편성을 최대한 도모한 것이다. 또한 정하중 하에서 강한 재료는 동하중 하에서도 상대적으로 강할 것이라는 가설을 내포한 것이기도 하다. ⑤는 소성변형의 유발이 압축과 전단의 복합적인 응력상태의 발생으로 야기된다는 점을 전제로 하고 있다. 그리고 얻어질 결과치를 소성변형 특성시험으로 이미 그 효용성이 인정된 WT나 APA등과 비교를 통해 검증해야 할 것이다.

2.2 초기 시험

개발 초기단계의 시험은 원형(쇠구슬) 하중붕을 통해 하중을 가하는 실험과 공시체 측면을 구속하는 실험으로 시작하였다. <표 1>은 초기단계의 시험 및 조정과정을 보여준다.

<표 1> 개발 초기 공시체와 하중 붕, 시험조건의 선정과정

대 상	내 역	문제점	수정안
공시체	∅100mm 측면구속	최대하중 발견 불가	혼합물 자체 구속에 의한 저항성 측정방안 모색
하중 붕	하단 반 구체(쇠구슬) ∅ 30, 40mm	변동성 과다	∅ 50mm 반 구체 하중 붕 하단 평면 붕 시도
//	하단 50mm 반 구체 평면 붕	변동성 여전히 과다 골재 파쇄, 변동성 큼	측면 원형 절삭 붕 시도
공시체	∅100mm, 150mm 비교	둘 다 최대하중 발견 가능, 붕 직경 중요	두 공시체 사용가능
하중붕	측면 원형 절삭붕	붕 직경(D) 차이 분석 필요	∅ 20, 30, 40, 50mm 시도
//	//	측면 원형절삭 반경(r) 중요	r=5, 10mm 시도
//	하중붕 ∅ 20, 50mm 제외	20mm: 골재크기에 영향 50mm: 100mm 공시체에 비해 과다(쇄기효과로 변동성 과다)	변동성 크므로 제외
//	∅ 30, 40mm 분석	r=5, 7.5, 10, 12.5mm로 r/D 민감도 분석	0.167 ≤ r/D ≤ 0.30 적정 r/D = 0.25가 최적으로 선정
//	∅ 30, 40mm 분석	r/D=7.5/30, 10/40을 집중 분석	r/D=10/40이 WT와의 상관성분석을 통해 최종 선정

움푹한 변형 유발을 위해 쇠구슬과 같이 하단이 직경 30, 40mm의 반 구체로 만들어진 하중 붕을 가지고 공시체 평면 중앙에 하중을 가하였으나 같은 혼합물 내에서 변동성이 크게 나타났다. 변동성을 줄이고자 보다 직경이 큰 50mm 반



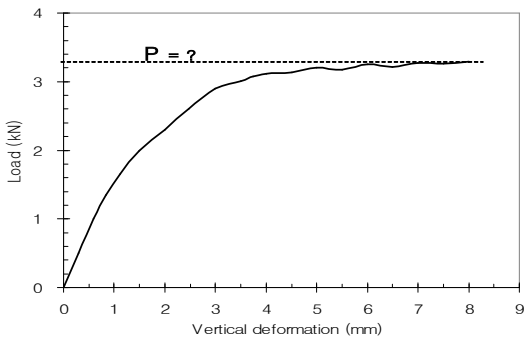
구체 하중 붕을 사용하였으나 여전히 변동성이 커서 구체를 완전히 없앤 하단 평면 붕을 사용해 보았다. 구체 하중붕이 변동성이 크게 나타나는 것은 구체가 침하시 골재 배열 상태에 따라 민감하게 반응이 나타나기 때문인 것으로 보인다. 평면 붕의 경우 구체에 비해 변동성은 다소 줄었으나 표면 가까이 노출된 굵은 골재가 붕의 직각부에 의해 파쇄되어 시험 오차가 유발되었다. 따라서 하중붕은 평면 중앙부와 원형이 되도록 절삭한 가장자리 모양이 필요함을 알 수 있었다.

2.3 공시체의 측면구속

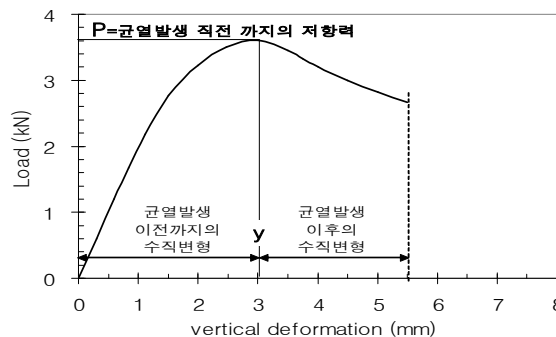
하중붕의 하단원형절삭 붕의 필요성 확인과 함께 초기에는 공시체의 측면 구속 방법을 연구하였다. 몇 가지 방법으로 직경 100, 150mm 공시체의 측면을 구속하고 재하를 해본결과 두 가지 문제점을 발견하였다. 첫째는 측면구속 방법 결정의 어려움이고 둘째는 구속 상태로 재하시 최대하중 점 발견의 어려움이었다. 즉, 도로포장체와 같은 상태로 측면구속 압을 일정하게 제공하기 위해서는 강재, 목재 또는 플라스틱 재료를 사용해야 하는데 재료를 표준화하는 것이 하나의 문제였다. 게다가 구속력을 어느 수준으로 어떤 방식으로 가해야 하는지도 쉬운 것이 아니었다.

하지만 더 큰 문제는 어떤 방법이든 공시체를 구속해 놓고 재하 할 경우 하중 붕에 의해 움푹한 변형은 유발이 되나 하중-변형곡선에 최대하중의 형태가 잘 나타나지 않았다(그림 1). 즉 하중을 가하면 일정 수준 이상에서 변형의 증가와 함께 지속적으로 완만히 하중의 증가가 계속되어 최대하중 점(정점)을 찾기가 불가능하였다.

따라서 측면 구속으로는 최대하중을 사용한 특성 평가가 불가능 한 상태이므로 구속 없이 하중을 가하였다. 이 경우 거의 전부 하중-변형 곡선에 정점이 만들어 졌으며 직경 100mm와 150mm 공시체 모두가 비슷한 형태를 보였다. 대표적인 곡선의 모양은 <그림 2>와 같으며 이 결과를 분석하여 다음과 같은 논리를 얻게 되었다.



<그림 1> 측면구속 공시체의 대표적 하중-변형곡선



<그림 2> S_D 시험에서 하중-변형곡선의 부분별 설명

Natural confinement

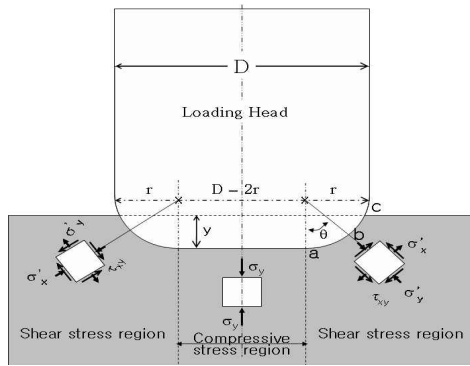
인공적인 측면 구속이 없어도 하중붕에 의한 재하면적에 비해 공시체 자체가 더 크므로 공시체 재하부분 이외의 모체의 자체 구속력으로 어느 정도 변형에 대한 저항성을 발휘한다. 그리고 재하부분 이외의 체적이 클수록 구속력이 크고 또한 재료자체가 외력에 견디는 저항력이 강할수록 구속력이 크다. 재하이외부분의 체적이 크다는 것은 공시체 크기와 관련이 있고, 재료자체 저항력의 대소는 재료의 특성에 기인한다. 따라서 만일 공시체 크기를 고정한다면 재료(혼합물)특성 만이 저항력을 나타내는 요인이 될 것이다. 또는 같은 재료의 경우 공시체가 클수록 자체구속력이 더 커서 저항성이 큰 것으로 나타날 것이다. 따라서 일정한 공시체에서 자체 구속력의 크기만 비교해도 그 재료 자체가 가지는 변형 저항성을 비교할 수 있다는 가정에 이르게 된다.

지속적인 하중에 의해 하중붕이 눌러 들어가면 공시체는 전단응력에 의해 측면으로 유발되는 변형 때문에 궁극적으로 쪼개지면서 파괴가 일어나게 되는데 쪼개지는 순간부터 하중은 더 이상 증가하지 않는다. 따라서 이때의 최대하중(<그

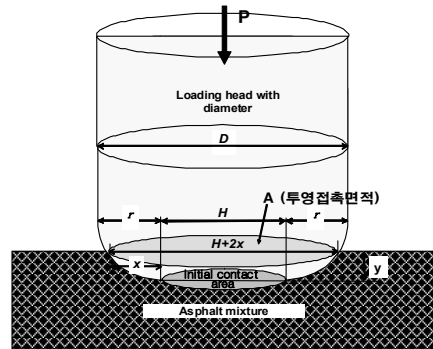
림 2)의 P는 공시체가 균열로인해 하중에 견디는 저항력을 급속도로 상실하기 직전까지의 내력(Force)의 크기이다. 또한 이때까지의 수직변형(y)은 공시체 중심 압축부로부터 방사선 방향(Tangential direction)으로 균열이 발생되기 직전까지 그 재료가 변형에 저항한 특성을 나타낸다. 따라서 P는 클수록 그리고 발생된 변형 y는 적을 수록 더 강한 것이므로 이를 적절히 수식화하여 강도를 계산 할 수 있을 것이다.

2.4 응력 상태

중양부가 평면이고 측면을 원형 절삭한 하중봉에 의해 불구속 공시체 내부에 발생하는 응력의 상태는 <그림 3>과 같이 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 즉 중심부의 순수 압축부분과 측면의 전단응력 부분이다. 하중에 의해 공시체에 하중봉이 y 만큼 침하되어 들어가면 공시체 내부는 이 두 가지 응력이 발생하고 각 부분에 있는 미소요소로 나타낼 수 있다. 따라서 이를 방향별 분력으로 구분하여 계산하면 각각 전단응력과 압축응력을 계산 할 수 있다. 수직방향 응력 σ_y 응력요소의 총 합인 전체응력은 가해진 수직 하중을 y 깊이에서 공시체 표면과 맞닿은 하중봉의 투영 단면적으로 나눈 것으로 이는 공시체가 y 만큼 수직 침하되는 변형을 유발한다. <그림 3>의 b 점의 수직응력에 연해있는 미소요소의 전단응력 τ_{xy} 와 σ'_x 는 혼합물이 측면으로 밀려나가거나 용기되는 변형을 유발한다. 하지만 공시체에서 y는 비교적 적으며 (0.5mm 내외) 전단응력은 위치마다 다르고 이 응력요소가 발생하는 면적이 작다. 더구나 60℃의 아스팔트 혼합물은 준소성체(Semi-plastic)이므로 탄성역학이 잘 맞지 않으므로 본 연구에서는 근사식으로 가해진 최대하중을 y 깊이에 연한 하중봉의 단면적으로 나눈 값을 강도로 구하도록 하였다.



<그림 3> 미소요소를 통한 공시체 내부 응력상태의 2-D 모식도.



<그림 4> 하중봉이 공시체에 눌러 들어가며 만든 투영 접촉면적의 3-D 모식도

변형강도의 계산식의 특징은 <그림 4>에서 보여준 투명접촉면적 A의 계산에 있다. 하중에 의해공시체가 파괴될 때 하중봉과 공시체가 맞닿은 면적은 사발과 같이 곡면을 이루고 봉이 눌러 들어간 깊이에 따라 차이가 난다. 이를 반영하기 위해 공시체 표면과 맞닿은 투영 원의 면적을 취할 경우 하중봉의 눌러 들어간 깊이에 따라 투영 원의 직경이 달라져 면적이 변한다. 그러므로 변형강도를 하중 P와 y에 따라 변하는 재하면적 A의 함수로 정했다. A의 직경은 $H+2x = [(D-2r)+2x]$ 이며 원 면적은 $A = \pi[(D-2r)+2x]^2/4$ 이다. 여기서 x는 r과 y의 함수이므로 A는 하중봉의 침하깊이로 측정되는 수직 변형 y와 원형절삭반경 r의 함수가 된다. 즉, 변형강도는 하중과 수직변형이 둘 다 계산에 고려되므로 단순 $\sigma = P/A$ 공식과 달리 비선형 거동을 하는 소성재료에 적용될 수 있어 고온에서 소성변형이 유발되는 아스팔트 혼합물의 강도계산에 적용이 가능하다. 즉, 변형강도(S_D)의 계산식은

$$S_D = \frac{4P}{\pi(D-2(r-\sqrt{2ry-y^2}))^2}$$



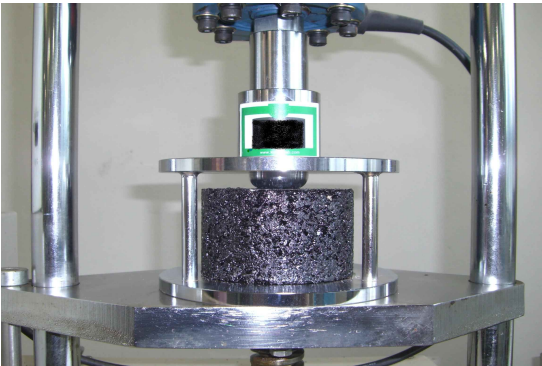
이다. 하지만 그 이후 계속된 연구에서 $r = 10\text{mm}$, $D=40\text{mm}$ 로 결정되었으므로 이식은 보다 간단히 식 (1)로 만들어졌다.

$$S_D = \frac{0.32P}{[10 + \sqrt{20y - y^2}]^2} \quad (1)$$

여기서 S_D = 변형강도 (MPa), y = 최대하중 P에서의 수직 침하깊이(mm)이다. 식 (1)에 의한 강도 값은 변형에 저항하는 재료의 강도 (Material strength against deformation)를 의미하므로 이를 변형강도 (Deformation strength: S_D)라 명명하고 이 시험법을 개발자의 성을 따라 Kim Test라 명명하였다(5-7).

2.5 시험방법

시험온도는 반복주행 (Wheel tracking) 시험과 같은 온도인 60℃에서 수행하기 위하여 공시체를 시험 전 30분간 60℃에 수침 후 꺼내서 신속히 <그림 5>와 같은 재하장치에서 직경 $D=40\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ 의 하중봉을 통해 수직으로 정하중을 30mm/min로 가한다. 하중이 증가 함에 따라 중앙부가 움푹하게 들어가며 <그림 6>과 같이 파괴가 일어나며 <그림 2>와 같은 곡선에서 P와 y를 읽어 식 (1)로 S_D 를 계산한다.



<그림 5> Kim Test setting



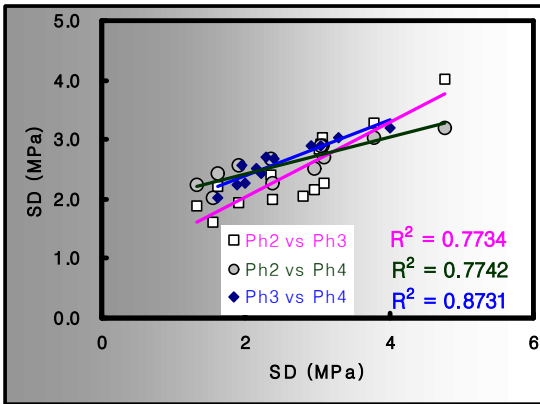
<그림 6> A typical failure shape of a specimen

3. 변형강도의 특징

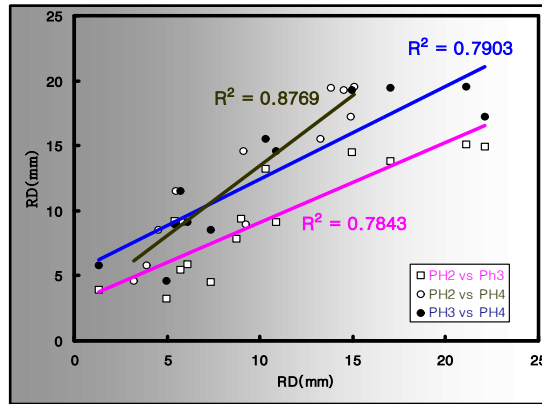
3.1 반복성

S_D 시험의 반복성은 초기의 연구 2, 3, 4단계의 같은 혼합물데이터를 이용하여 분석하였다. 각 단계는 약 6개월의 시차가 있으며 <그림 7>, <그림 8>은 S_D 와 WT의 반복성 분석을 비교하여 보여주고 있다. 그림의 2단계 연구는 슬래브 공시체(305 x 305mm)의 중앙에서 WT 시험을 하고 그 이후에 양 옆에서 4개의 100mm 코어를 채취하여 S_D 시험을 한 평균이다. 한편, 3단계 연구는 2개의 S_D 측정용 100mm 코어공시체를 1/2 슬래브(150 x 305mm)에서 채취하였고, 4단계에서는 3개의 코어를 5/9 슬래브(170 x 305mm)에서 채취하여 각각 변형강도를 측정하였다(그림 9). 따라서 그림의 한 점은 각각의 단계별로 4, 2, 3 개의 측정치의 평균에 의해 만들어진 것이다.

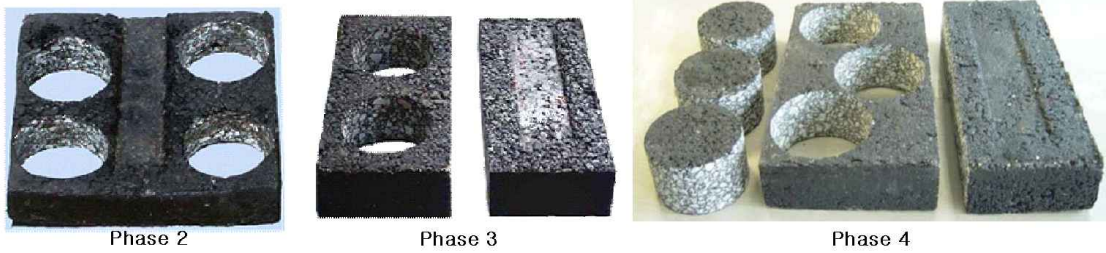
또한 S_D 뿐만 아니라 다른 아스팔트 혼합물의 특성시험 결과에 대한 반복성도 다짐기의 종류별로 구분하여 분석하였으며 이는 <표 2>와 같다. 표에서 보듯이 S_D 는 롤러다짐기와 자이레토리 다짐기에서 둘 다 WT 시험에 버금가는 양호한 반복성을 보인 반면 마샬 안정도나 간접인장강도(ITS)는 반복성이 훨씬 낮았고 특히 간접인장강도의 반복성은 가장 낮았다. 이를 통해 S_D 의 반복성이 매우 양호한 시험법임을 알 수 있었다.



〈그림 7〉 S_D의 반복성(8)



〈그림 8〉 WT의 반복성(8)



〈그림 9〉 연구 2, 3, 4, 단계별 WT과 S_D의 공시체의 이용방법

〈표 2〉 혼합물의 특성시험 방법별 다짐기별 회귀분석을 통한 반복성(R²)의 비교(8)

Compactor	S _D	Marshall Stability	ITS	WT
Marshall compactor	-	0.2467	0.1090	-
Gyratory compactor	0.7833	0.6521	0.0665	-
Roller Compactor	0.8069	-	-	0.8172

3.2 타 특성치와의 상관관계

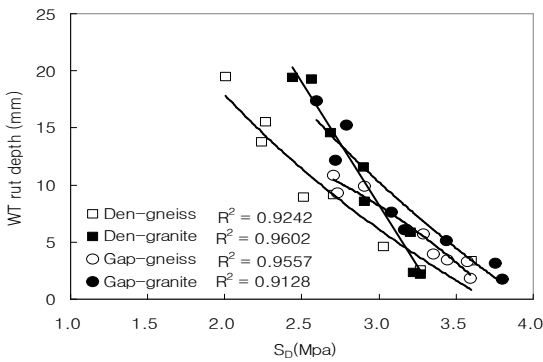
S_D 값과 소성변형 관련 여타시험 결과와의 반복성은 매우 많은 연구를 통해 검증하였다. 그 비교 특성시험법은 반복주행(wheel tracking)시험, Asphalt pavement Analyser (APA)시험, 동적크리프 (Repeated load creep)시험, 모의 원형주행시험(Field circular wheel tracker) 및 현장 소성변형상태와의 상관성 등 다양하다. 또한 바인더의 특성에 따른 혼합물의 소성변형특성은 골재를 고정하여 파악할 수 있는데 본 연구에서는 바인더의 소성변형계수인 G*/sinδ 와 GPC (Gel-permeation chromatogram) 분석을 통해 얻을 수 있는 대형분자비율(Large molecular size (%): LMS)을 사용하였다. 본 연구에서는 이제 까지 얻어진 R² 값들을 요약하면 〈표 3〉과 같다. 또한 대표적인 특성으로 WT의 rut depth와 S_D, APA rut depth와 S_D의 대표적인 회귀분석 결과를 〈그림 10〉과 〈그림 11〉에서 보여준다.

〈표 3〉과 〈그림 10〉, 〈그림 11〉에서 보듯이 S_D는 WT 관련 특성[소성변형 깊이와 동적안정도(Dynamic stability)]과 R²이 가장 높았으며 동적크리프시험(RLC)과 가장 낮으나 여전히 0.64이상으로 양호 편이며 전반적으로 0.75이상의 관계를 보임을 알 수 있다. 즉, 이는 S_D 값이 큰 혼합물은 WT나 APA 시험시 소성변형 깊이가 적게 나타나고 반면 S_D가 낮으면 더 깊이 들어간다는 의미이다.

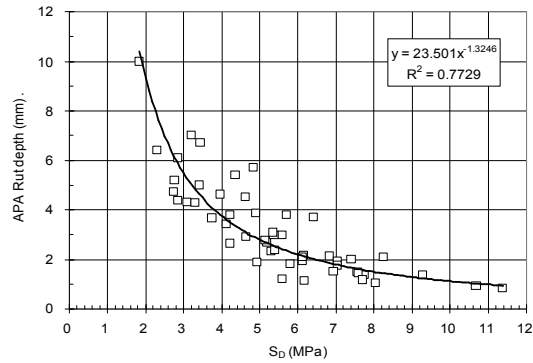


〈표 3〉 혼합물의 각종 특성결과와 S_D 의 회귀분석을 통한 결정계수(R^2)

S_D vs.	Binder		Mixture					
	$G^*/\sin\delta(9)$	LMS(%) (10)	WT		APA rut depth(13)	RLC final deform. (14)	FCWT rut depth(15)	Field rut depth(15)
			Rut depth(11)	Dynamic stability(12)				
R^2	0.8816	0.7560	0.9293	0.9609	0.7729	0.6409	0.8019	0.7109



〈그림 10〉 Typical regression results for WT vs. S_D



〈그림 11〉 Relation of APA rut depth vs. S_D

3.3 실용성

S_D 값은 반복성, 여타 소성변형 관련 시험과의 상관성이 높은 우수한 특성치임을 확인하였다. 또한 공시체도 날개로 제조하는 Gyrotory 공시체, 코어채취로부터 얻은 공시체 등 표면이 평편하고 두께가 $63 \pm 2\text{mm}$ 인 직경 100-150mm 공시체 모두에 적용이 가능하며, 장비도 기존의 마샬장비를 사용이 가능하므로 실용성이 매우 크다. 따라서 국내와 미국의 혼합물을 사용한 다양한 연구를 통해 국내 배합설계에서는 하나의 변수로 채택하였으며, 가장 많이 사용되는 밀입도 혼합물에 대하여 100mm 공시체의 경우 일반도로는 3.2MPa, 간선도로는 4.25MPa로 임계치를 결정하였다.

4. 결론

변형강도는 여러 가지 소성변형특성 시험 (WT, APA, RLC 등) 결과와 결정계수(R^2)가 0.75이상, 모의주행시험기 (FCWT) 및 실제도로 포장의 소성변형 상태와도 R^2 이 0.7 이상을 보이는 등 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성과 상관성이 높은 시험 치이다. 따라서 이의 사용은 번거로운 소성변형 시험을 줄일 수 있고 배합설계의 인자로 사용할 경우 사전에 소성변형 저항성이 고려된 아스팔트 혼합물을 얻을 수 있게 될 것이다. 따라서 국내에서는 이를 아스팔트혼합물의 배합설계 변수로 채택하여 우선 밀입도에 적용하여 기존의 형식적인 마샬 안정도를 대치하고 보다 소성변형에 강한 혼합물을 제조하는 계기를 마련하였다. 이는 국내에서 개발된 시험법을 국내기준에 도입하는 선도 사례로서 의미가 크다 하겠으나, 향후 적용결과를 지속적으로 추적 조사하여 보다 발전된 시험법으로 완성하는 노력이 따라야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 자유공모과제 연구비의 지원에 의하여 강원대학교, 석재복합건설신소재연구소의 시설을 이용하여 이루어진 것입니다



참고문헌

1. Doh, Y. S., Yun, K. K., Amirghanian, S. N. and Kim, K. W., "Framework for developing static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures," *Construction and Building Materials*, 21(12), Dec. 2007.
2. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirghanian, S. N., "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 5, No. 3., Dec. 2004, 303-322.
3. 김광우, 도영수, 조문진, "바인더 Stiffness와 혼합물의 변형강도 및 동적크리프 특성과의 상관성 분석을 통한 김테스트 적용성 고찰," *한국도로학회 논문집*, 2005. 12. Vol 7, No. 4, 91-100
4. 김광우, 임동섭, 정재현, 이종섭, 도영수, "현장 소성변형 모사를 위한 원형주행 시험기(FCWT)의 개발," *석재연 논문집*, 제 11권, 2006. 12.
5. "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항성 평가방안 연구," 1년차 연구보고서, 강원대학교, 건설교통부, 2006. 12.
6. "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항성 평가방안 연구," 2년차 연구보고서, 강원대학교, 건설교통부, 2007. 12.
7. 김광우, 임동섭, 정재현, 이종섭, 도영수, "Development of Field Circular Wheel Tracker (FCWT) for Asphalt Pavement Field Rutting Simulation," *석재연 논문집*, 제 11권, 2006. 12.
8. 정재현, 이종섭, 박남원, 김현환, 백성현, 이순제, 김광우, "Suggestion for critical S_D of asphalt mixture for rut-resistance criteria," *석재연 논문집*, 제 12권1호, 2007. 6. 21-31
9. 김광우, 조병진, 이순제, 도영수, "고온 내변형 아스팔트혼합물 선정을 위한 변형강도 임계치의 결정방안," *한국도로학회 논문집*, 9(4), 2007. 12. 193-204.
10. 정재현, 이종섭, 박남원, 김광우, "Change of deformation characteristics due to change of large molecular size of asphalt binder," *한국도로학회 봄 학술대회 논문집*, 2007. 3.
11. Kim, K. W. "Strength against Deformation of Asphalt Concretes at High Temperature," Paper presented at UKC-2005 conference, Irvine, CA, USA. 2005. 8.
12. Kim, K. W., Lee, G. H., Lee, M. S. Choi, S. J. "Development of Deformation Strength as a Relative Index for Estimating Rut Resistance of Asphalt Concretes," *Proceedings of 5th ICPT*, Ed. by Kim, May 2005, 864-871.
13. Kim, H. H., Park, N. W., Doh, Y. S., K. Ahn, Lee, S. J. and Amirghanian, S. N., Kim, K. W., "Rutting Estimation of Asphalt Pavement Mixtures using Deformation Strength," EATA08, European Asphalt Technology Association Meeting, Lyon, France, April. 2008.
14. Kim, K. W., Lee, G. H., Kwon, O. S. and Cho, M. J., "Validation of Kim Test Using Asphalt Pavement Analyzer and Dynamic Creep Test," *Proceedings of 5th ICPT*, Ed. by Kim, May 2005, 534-540.
15. "아스팔트 콘크리트의 고온변형저항성 평가방안 연구," *건설교통부 자유공모과제 3차년도 자문회의보고서*, 강원대학교, 2008. 7.